

который. после утверждения всеми участниками, размещаются в базе данных Программы сличений КООМЕТ. После этого они публикуются в соответствующих журналах.

На рис. 2, б хорошо прослеживается негладкость импульса Эталона РЭМП. Московские коллеги высказали предположение, что это отражения и предложили провести дополнительные работы по устранению.

Вывод. В результата международных сличений расхождения показаний Эталона РЭМП и ГЭТ 148-93 не превышают 5,4 %. Рабочей группой были высказаны замечания по недостаткам в работе Эталона РЭМП, которые будут устранены в ближайшем будущем.

Список литературы: 1. Рекомендация КООМЕТ. Положение о сличениях эталонов национальных метрологических институтов КООМЕТ. 2. ГОСТ 8.540-2006. государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений максимальных значений напряженностей импульсных электрического и магнитного полей. 3. Гирка Ю.Н., Немченко Ю.С. Методические аспекты проведения метрологической аттестации средств измерения электромагнитных полей на Эталоне РЭМП // Вестник НТУ «ХПИ». – 2007. – Т. 1, № 34. – С. 29–35.

Поступила в редколлегию 14.05.2008

УДК 621.319.4

Ю.В.КРАВЧЕНКО; НТУ «ХПИ»

РЕСУРС ПРОПИТАННОЙ БУМАЖНО-ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Наведені результати ресурсних випробувань секцій високовольтних імпульсних конденсаторів з різним вмістом поліпропіленової плівки, які були просочені трансформаторним або касторовим маслом.

The resource testing results of the high voltage pulse capacitor sections with different content of polypropylene film impregnated with transformer or castor oil have been given

Постановка задачи. В высоковольтной импульсной технике широкое применение получила комбинированная бумажно-пленочная изоляция (наиболее часто в качестве пленки используют лавсан). В связи с прогрессом, достигнутым в создании новых качественных конденсаторных полимерных пленок (в частности, полипропиленовой с низким тангенсом угла диэлектрических потерь и высокой электрической прочностью) появилась возможность создания высоковольтных импульсных бумажно-полипропиленовых

конденсаторов с большим содержанием пленки в том числе и чисто пленочных. Полипропиленовая пленка уже завоевала прочные позиции при создании силовых конденсаторов переменного напряжения [1].

Имеющиеся экспериментальные данные [2-4] в одном случае [2] свидетельствуют об эффективности применения пленочной изоляции для импульсных конденсаторов, в другом [3,4] – при пропитке полипропиленовой изоляции нефтяным и касторовым маслом, обладающим значительно большей вязкостью, – получены весьма низкие значения ресурса, особенно для касторового масла.

Целью данной работы является сравнительная оценка ресурсных характеристик в импульсном режиме пропитанных конденсаторных секций с различной структурой диэлектрика и уточнение рекомендаций по применению полипропиленовой пленки для импульсных конденсаторов.

Конструкция образцов. Эксперимент проводился в несколько этапов на образцах конденсаторных секций, имеющих следующую структуру изоляции между обкладками (где Б – конденсаторная бумага марки МКОН-1 с толщиной листа 10 мкм; П – односторонне шероховатая полипропиленовая пленка типа TERFILM RER толщиной 12 мкм):

- I этап – испытание образцов ЗБ (10 шт.), 2П (32 шт.) и 3П, ПБП, ПБ, ППБ (по 25 шт. каждого вида), пропитка нефтяным маслом;
- II этап – испытание образцов ПБП, ПБ, ППБ (по 25 шт. каждого вида), пропитка касторовым маслом, допропитка нефтяным;
- III этап – испытание образцов ЗБ, 3П, БПБ, ПБП (по 15 шт. каждого вида), пропитка нефтяным маслом;
- IV этап – испытание образцов Б-2П-Б (9 шт.), Б-3П-Б (10 шт.), пропитка касторовым маслом.

Испытуемые секции имели конструкцию (рис. 1) идентичную конденсаторным секциям, которые были использованы при проведении экспериментов в работах [3,4]. Каждая секция состояла из трех параллельно включенных емкостных промежутков (рис. 1, б) для обеспечения условий создания конфигурации электрического поля, близкой к реальной. Активная площадь обкладки секции составила 60 x 90 мм. Друг от друга секции отделялись при помощи 4–10 слоев кабельной бумаги толщиной 120 мкм во избежание пробоя между соседними секциями.

При наличии смежных слоев полипропиленовой пленки (образцы 2П, 3П, ППБ, Б-2П-Б, Б-3П-Б) они укладывались таким образом, чтобы гладкая сторона одного слоя пленки соприкасалась с шероховатой стороной соседнего слоя пленки. Тем самым улучшались условия пропитки за счет повышения возможности проникновения жидкого диэлектрика между соседними слоями пленки.

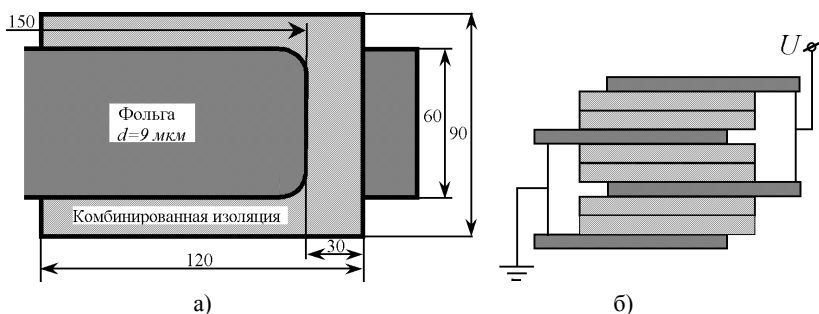


Рисунок 1 – Конструкция секций с бумажно-полипропиленовым диэлектриком, изготовленных для проведения эксперимента

Конденсаторные секции с несимметричной структурой диэлектрика между обкладками (образцы ПБ и ППБ) имели вид представленный на рис. 2. В данных секциях, для улучшения условий проникновения жидкого диэлектрика в ходе пропитки, односторонне шероховатые слои полипропиленовой пленки укладывались таким образом, чтобы шероховатая сторона была обращена к обкладке. Пропитка между гладкой стороной пленки и смежной обкладкой обеспечивалась за счет наличия между ними слоя конденсаторной бумаги.

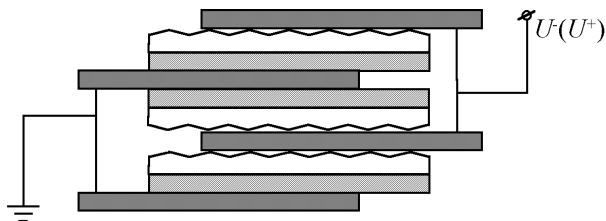


Рисунок 2 – Конструкция секции с несимметричной структурой диэлектрика

После сборки образцы предварительно затягивались и сушились в вакуумной камере при температуре 80 °С и вакууме 6,5 Па в течение 6 дней. Далее производилась заливка в бак с образцами предварительно отвакуумированного жидкого диэлектрика.

Пропитка происходила в течение 3 дней при вакууме 6,5 Па и температуре 30 °С при пропитке нефтяным и 70 °С при пропитке касторовым маслом. После окончания процесса пропитки производилась окончательная затяжка сборки образцов.

Методика проведения эксперимента. До и после пропитки проводилось измерение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов мостом Е7-8. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерения емкости образцов до и после пропитки

| Структура диэлектрика | Пропитывающая жидкость | Количество измеренных образцов, ед. | Тангенс угла диэлектрических потерь до/после пропитки, $\operatorname{tg}\delta \cdot 10^4$ | Средняя емкость образцов до пропитки, нФ | Средняя емкость образцов после пропитки, нФ | Относительное увеличение емкости после пропитки |
|-----------------------|------------------------|-------------------------------------|---|--|---|---|
| ЗБ | тр* | 25 | $(74 \div 80)/(58 \div 62)$ | 13,32 | 23,38 | 1,76 |
| 2П | тр | 43 | $(12 \div 16)/(8 \div 9)$ | 10,42 | 12,78 | 1,23 |
| 3П | тр | 40 | $(12 \div 13)/(8 \div 9)$ | 7,71 | 8,87 | 1,15 |
| ПБП | тр | 38 | $(24 \div 25)/(15 \div 16)$ | 8,94 | 11,45 | 1,29 |
| ПБП | к** | 27 | $(30 \div 36)/(19 \div 20)$ | 8,11 | 11,87 | 1,46 |
| ПБ | тр | 24 | $(30 \div 35)/(27 \div 29)$ | 12,94 | 18,42 | 1,42 |
| ПБ | к | 25 | $(33 \div 38)/(26 \div 28)$ | 12,16 | 19,94 | 1,64 |
| ППБ | тр | 26 | $(23 \div 26)/(17 \div 19)$ | 8,42 | 11,09 | 1,32 |
| ППБ | к | 24 | $(26 \div 30)/(19 \div 22)$ | 8,31 | 12,37 | 1,49 |
| БПБ | тр | 15 | $(36 \div 38)/(25 \div 27)$ | 10,72 | 15,01 | 1,40 |
| Б-2П-Б | к | 9 | $(33 \div 35)/(18 \div 20)$ | 8,30 | 11,25 | 1,35 |
| Б-3П-Б | к | 10 | $(28 \div 29)/(16 \div 17)$ | 6,23 | 8,21 | 1,32 |

* тр – нефтяное трансформаторное масло марки Т-1500;

** к – касторовое масло.

Необходимо отметить, что рост значения относительного увеличения емкости образцов после пропитки по сравнению с данными, приведенными в [4] для аналогичных конструкций секций, обуславливается применением предварительной и окончательной затяжки сборок образцов. Так емкость до пропитки измерялась при предварительной затяжке, а после пропитки – при окончательной. В то же время результирующая емкость образцов после пропитки незначительно (в пределах 1-2 %) отличается от данных, приведенных в [4]. Данный факт свидетельствует об отсутствии преимущества нового предложенного метода сушки и пропитки по сравнению со стандартной технологией термовакuumной обработки, примененной в [4]. В ходе проведения эксперимента проводились ресурсные испытания секций в стандартном режиме (частота разрядного тока контура 100 кГц и декремент колебаний 1,38).

Ресурсные испытания образцов проводились с использованием генератора поджигающих импульсов, который генерировал импульсы с частотой $f = 2$ Гц. Подаваемое на образец напряжение контролировалось при помощи электростатического киловольтметра С196.

Результаты испытаний. Как уже было указано выше, ресурсные испытания образцов проводились в несколько этапов. Результаты данных испытаний для образцов конденсаторных секций с различной структурой диэлектрика, проводившиеся на нескольких уровнях напряженности, представлены в табл. 2.

В ходе эксперимента для получения среднего ресурса определенного вида секций при выбранном уровне напряженности проводились идентичные ресурсные испытания не менее чем 4 образцов секций конденсатора.

Секции с несимметричной структурой диэлектрика между обкладками (ПБ и ППБ) испытывались напряжением как положительной, так и отрицательной полярности. Высокое напряжение от источника питания прикладывалось в данных секциях к обкладкам находящимся между листов полипропиленовой пленки (рис. 2). Значения средних ресурсов данных образцов представлены в табл. 2 в виде: ресурс при положительной полярности приложенного напряжения / при отрицательной.

Таблица 2 – Средние значения ресурса образцов конденсаторных секций

| Номер этапа | Структура диэлектри- ка | Средний ресурс при различных уровнях напряженности, импульсов | | | |
|----------------|-------------------------------|--|--------------|-------------|-----------|
| | | E , кВ/мм | | | |
| | | 125 | 150 | 200 | 250 |
| I | ЗБ | - | 4600 | 45 | - |
| | 2П | - | 11670 | 3008 | 470 |
| | 3П | - | 5072 | 1200 | 204 |
| | ПБП | - | 12284 | 1180 | 298 |
| | ПБ | - | 8685 / 10395 | 1180 / 1008 | 428 / 78 |
| | ППБ | - | 3795 / 4150 | 1128 / 340 | 440 / 258 |
| II | ПБП | - | 5172 | 828 | 292 |
| | ПБ | - | 4915 / 9265 | 1080 / 1700 | 203 / 88 |
| | ППБ | - | 4040 / 4990 | 235 / 1120 | 20 / 95 |
| III | БПБ | 38616 | 12291 | 2050 | - |
| | ПБП | 18930 | 7074 | 1170 | - |
| | 3П | 7232 | 5397 | 807 | - |
| | ЗБ | 5337 | 2469 | 45 | - |
| IV | Б-2П-Б | 24300 | 8156 | 435 | - |
| | Б-3П-Б | 15720 | 5188 | 270 | - |

На I этапе в ходе проведения ресурсных испытаний секций с двухслойной чисто пленочной изоляцией была проведена оценка влияния правильности укладки листов односторонне шероховатой полипропиленовой пленки на итоговый ресурс. Необходимо отметить, что используемая для изготовления

обкладок секций фольга имела зеркальную поверхность с одной стороны и матовую (что свидетельствует о наличии шероховатости) – с другой. Таким образом, в качестве «правильного» принимался такой способ укладки слоев пленки, при котором к зеркальной стороне обкладки прилежала шероховатая сторона пленки, а к матовой – гладкая. Испытания проводились на уровне напряженности $E = 150$ кВ/мм. Было испытано по 9 образцов с «правильной» и «неправильной» укладкой пленки и получены следующие значения средних ресурсов: 12380 и 10062 импульса соответственно (коэффициенты вариации k , равные отношению среднеквадратического отклонения к математическому ожиданию $k = \sigma_{lg M} / (lg M)_{cp}$ полученных значений ресурсов составили соответственно 2,4 % и 3,9 %).

Также на I этапе часть секций (6 образцов) с трехслойным чисто пленочным диэлектриком испытывалась с включенной в разрядный контур дополнительной индуктивностью. Ресурсные испытания данных секций проводились при напряженности электрического поля $E = 150$ кВ/мм. Включенная последовательно с испытуемой емкостью дополнительная индуктивность привела к снижению декремента колебаний в 1,25 раза, а также к снижению в 3,25 раза частоты разрядного тока контура (значения величины декремента колебаний и частоты разрядного тока определялись из осциллограмм, полученных на цифровом запоминающем осциллографе Tektronix – TDS – 1012B). Средний ресурс данных образцов составил 1917 импульсов с коэффициентом вариации 2,6 %.

Испытанные секции были разобраны для определения мест пробоя. Анализ расположения мест пробоя показал, что для образцов, содержащих полипропиленовую пленку (практически независимо от величины процентного содержания) 80-85 % точек разрушения изоляции находятся на краю обкладки. Пробои в однородном поле для данных образцов происходили при напряженности электрического поля $E = 200-250$ кВ/мм. В то же время для образцов с чисто бумажным диэлектриком (ЗБ) места пробоев располагались преимущественно в однородном поле (около 65 %).

Анализ результатов. Согласно с приведенными в табл. 2 результатами наибольшие значения ресурса в диапазоне изменения напряженности $E = 125-200$ кВ/мм относятся к образцам со структурой БПБ. Это объясняется снижением напряженности электрического поля вблизи края обкладки (в самой напряженной области) за счет прилегания к ней слоя изоляции с высокой диэлектрической проницаемостью. Листы конденсаторной бумаги обеспечивают высококачественное заполнение жидким диэлектриком пространства между обкладкой секции и слоем пленки.

Улучшение качества пропитки конденсаторных секций с чисто пленочным диэлектриком можно достигнуть путем соблюдения правильности укладки листов односторонне шероховатой полипропиленовой пленки по от-

ношению друг к другу и обкладке секции, о чем косвенно свидетельствует повышение ресурсов образцов на $\approx 20\%$ и снижение в 1,5 раза коэффициента вариации.

Влияние полярности приложенного к испытываемому образцу напряжения исследовалось на секциях с несимметричной структурой диэлектрика (ПБ и ППБ). Полученные результаты показывают, что на уровне напряженности $E = 150$ кВ/мм, ресурс секций, испытанных при отрицательной полярности приложенного напряжения превышает аналогичную характеристику при напряжении положительной полярности на 10-90 %. Для более высоких уровней напряженности ($E = 200-250$ кВ/мм) закономерности в полученных значениях ресурса в зависимости от полярности приложенного напряжения не прослеживается, что связано с изменением механизма разрушения изоляции [4] и, соответственно, увеличением разброса полученных результатов.

Результаты испытаний секций с трехслойным пленочным диэлектриком при подключении добавочной индуктивности в разрядный контур показали, что снижение декремента колебаний в 1,25 раза, а также уменьшение в 3,25 раза частоты разрядного тока контура приводит к снижению наработки образцов в $5072/1917 \approx 2,6$ раза. Такое значительное снижение ресурса противоречит эмпирической формуле для ресурсов секций с чисто полипропиленовой изоляцией приведенной в [2], согласно которой подобное изменение параметров разрядного контура должно привести к росту ресурса образцов в $\approx 1,4$ раза.

Определение показателя степени в формуле «жизни» – зависимости ресурса от напряженности поля – по данным, приведенным в табл. 2, согласно формуле:

$$200n = \frac{\ln \frac{M_i}{M_j}}{\ln \frac{E_j}{E_i}}, \quad (1)$$

где M_i (M_j) – ресурс i -той (j -той) секции на напряженности E_i (E_j), показало, что значения показателя степени n находится в пределах 2–18.

Максимальные значения показателя степени были получены для образцов с чисто бумажной изоляцией, пропитанной нефтяным маслом. Это обусловлено разрушением изоляции секций при действии одновременно двух механизмов пробоя (как в области равномерного электрического поля, так и на краях обкладок), что подтверждается результатами анализа мест пробоя испытанных секций. Для остальных образцов значение показателя степени преимущественно находится в диапазоне 6-10.

На рис. 3 приведены зависимости удельной энергии испытанных на III этапе эксперимента образцов от ресурса. Для сравнения на данном рисунке также дана зависимость удельной энергии бумажно-касторовых секций (по данным работы [5]).

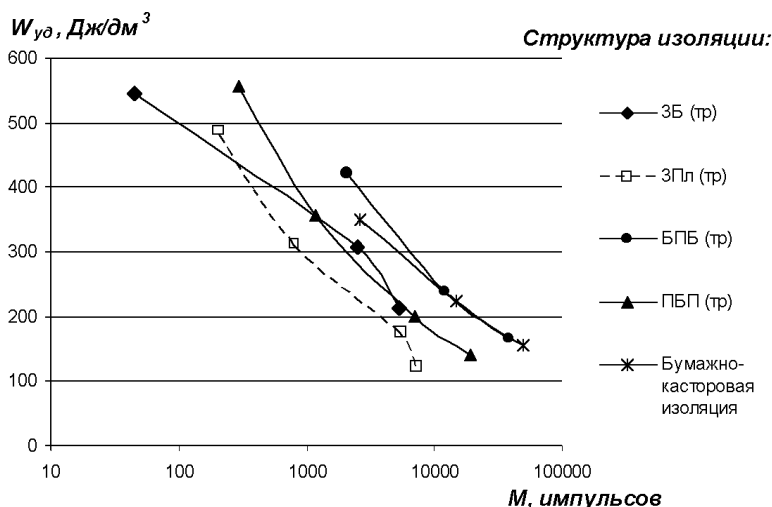


Рисунок 3 – Удельная энергия образцов с пропитанной полипропиленовой, комбинированной и с бумажно-касторовой изоляцией

Анализ кривых (рис. 3) показывает, что образцы с комбинированным диэлектриком структуры БПБ при равных значениях наработки до отказа не уступают по значениям удельной энергии бумажно-касторовой изоляции, а при повышенной напряженности поля $E > 150$ кВ/мм даже превосходят. Образцы со структурой ЗБ, ЗП, ПБП значительно уступают бумажно-касторовой изоляции по ресурсу при равной удельной энергии. Высокие значения удельной энергии для данных образцов $W_{уд} \approx 0,5$ Дж/дм³ достигаются на уровнях напряженности, при которых ресурс секций не превышает 300 импульсов (для образцов ЗБ это уровень напряженности $E = 200$ кВ/мм, для ЗП и ПБП – $E = 250$ кВ/мм).

Следует отметить, что ресурс бумажно-касторовой изоляции на напряженностях 125-150 кВ/мм (по данным [6]) ниже полученных в ходе данного эксперимента значений ресурса для секций с комбинированным диэлектриком (в 1,3 раза для секций ПБП и в 2,5 раза для секций БПБ), но в 2-2,5 раза превышает ресурс секций с чисто полипропиленовой пленкой (ЗП) и конденсаторной бумагой (ЗБ), пропитанных нефтяным маслом.

На рис. 4 приведены значения среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации ресурсов (вычисленных в предположении, что закон распределения образцов по ресурсу является нормально-логарифмическим) испытанных на III и IV этапе эксперимента образцов в зависимости от структуры диэлектрика.

Анализ диаграммы (рис. 4) показывает, что минимальные значения коэффициента вариации и среднеквадратического отклонения относятся к об-

разцам с чисто пленочной изоляцией. Секции с комбинированным диэлектриком, в которых к обкладкам прилегали листы конденсаторной бумаги (БПБ, Б-2П-Б, Б-3П-Б) показали практически равные значения среднеквадратического отклонения ($\sigma = 0,16 \div 0,2$) и коэффициента вариации ($k = 3,8 \div 5,4$ %). Наибольший разброс полученных значений ресурсных испытаний характерен для образцов ПБП (возможно из-за некачественной пропитки промежутка между обкладкой и пленкой) и ЗБ (для которых на напряженности $E = 150$ кВ/мм разрушение изоляции может происходить в результате действия одновременно двух механизмов пробоя).

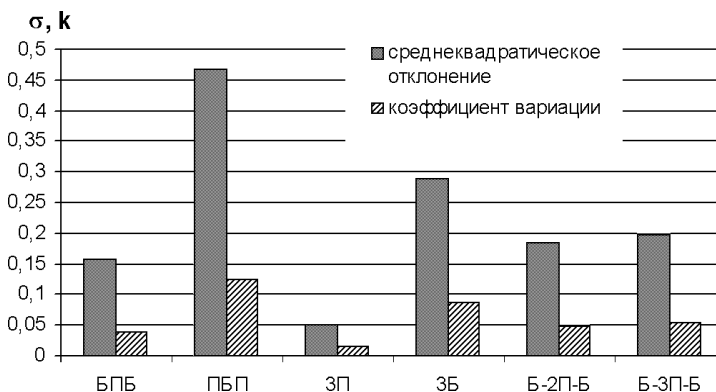


Рисунок 4 – Среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации ресурса испытанных образцов (при $E=150$ кВ/мм)

Выводы:

- 1 Метод сушки и пропитки, примененный при осуществлении эксперимента, не дал положительного результата, как в отношении повышения емкости, так и улучшения ресурсных характеристик образцов с чисто пленочной изоляцией по сравнению со стандартной технологией термовакуумной обработки, примененной в [4].
- 2 Наибольшие значения ресурса в диапазоне изменения напряженности $E = 125-200$ кВ/мм относятся к образцам с комбинированным диэлектриком, в которых к обкладкам прилегали листы конденсаторной бумаги (БПБ, Б-2П-Б, Б-3П-Б).
- 3 Улучшение качества пропитки конденсаторных секций с чисто пленочным диэлектриком можно достигнуть путем соблюдения правильности укладки листов односторонне шероховатой полипропиленовой пленки по отношению друг к другу и обкладке секции
- 4 Образцы с комбинированным диэлектриком структуры БПБ при равных значениях ресурса не уступают по значениям удельной энер-

гии бумажно-касторовой изоляции, а при повышенной напряженности поля $E > 150$ кВ/мм даже превосходят. Образцы со структурой ЗБ, ЗП, ПБП значительно уступают бумажно-касторовой изоляции по ресурсу при равной удельной энергии.

Список литературы: 1. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов / *Богатенков И.М., Бочаров Ю.Н., Гумерова Н.И., Иманов Г.М.* и др.; Под ред. *Кучинского Г.С.* – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с. 2. *Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я.* и др. Прогнозирование ожидаемого среднего ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком в зависимости от режимов эксплуатации // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы XII Межд.науч.школы. – Николаев: КП«Николаевская областная типография», 2005. – С. 125-126. 3. *В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко, Д.А.Доценко* Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной касторовым маслом, в импульсном режиме // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП». – 2006. – № 37. – С. 113-118. 4. *В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко* Ресурс пленочной полипропиленовой изоляции, пропитанной трансформаторным маслом, в импульсном режиме // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП». – 2007. – № 20. – С. 167-174. 5. *В.В.Рудаков, О.Ю.Дубийчук, В.П.Кравченко* Предельные удельные характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов // Вісник НТУ «ХП».Збірник наукових праць.Тематичний випуск. Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХП». – 2004. – № 7. – С. 142-147. 6. *Дубийчук О.Ю., Рудаков В.В.* Экспериментальное определение показателей надежности секций конденсаторов с бумажно-касторовой изоляцией // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 1. – С.71-75.

Поступила в редколлегию 22.05.2008

УДК 621.313

В.В.КРИВУЩЕНКО; А.А.ПЕТКОВ, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»

РАСЧЕТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИМИТАЦИИ ТОКОВ, ЗАДАННЫХ ИНТЕГРАЛОМ ДЕЙСТВИЯ

У роботі досліджена можливість формування імпульсу струму, заданого набором амплітудно-часових параметрів та інтегралом дії. Розглянуто вибір параметрів традиційної схеми розряду ємнісного накопичувача енергії.

In work capability of the current impulse formation specified by a combination of amplitude-time parameters and action integral is investigated. The parameters selection of the traditional scheme of the energy capacitor storage discharge is considered.

Постановка проблемы. Интеграция Украины в мировую экономику ставит задачу проведения сертификации выпускаемой продукции в соответ-